

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20190524003

朱文静, 胡文革, 张映东, 等. 大泉沟水库不同水文时期浮游动物群落特征及其对水环境因子的响应[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(6): 243-251

Zhu W J, Hu W G, Zhang Y D, et al. Characteristics of zooplankton communities and their responses to water environmental factors during different hydrological periods of the Daquangou Reservoir [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(6): 243-251 (in Chinese)

大泉沟水库不同水文时期浮游动物群落特征及其对水环境因子的响应

朱文静¹, 胡文革^{1,*}, 张映东², 贾文平³, 马得草¹, 高岩¹, 尤洋², 张秀荣²

1. 石河子大学生命科学学院, 石河子 832000

2. 新疆石河子玛纳斯河流域管理处, 石河子 832000

3. 天津市水产研究所, 天津 300221

收稿日期: 2019-05-24 录用日期: 2019-08-03

摘要: 于枯水期(2015年10月)、丰水期(2016年4月)和平水期(2016年7月)对大泉沟水库内4个采样点进行了3次水样及浮游生物调查, 对水库浮游动物密度及生物量与水体环境因子进行 Pearson 相关性分析, 以探究大泉沟水库浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系, 并对水质状况进行综合评价, 为库区水资源保护和渔业可持续发展提供参考依据。此次调查研究共鉴定出浮游动物 39 种, 其中, 轮虫 21 种, 枝角类 8 种, 桡足类 5 种, 原生动物 5 种; 整个采样时期均是优势种的浮游动物 ($Y > 0.02$) 有 7 种。此外, 浮游动物的物种数、优势种类和密度在平水期达到最大值, 生物量则在枯水期达到最大值。通过单因子方差分析发现, 3 次调查期间浮游动物的密度变化显著 ($P < 0.01$), 物种组成和优势种差异显著 ($P < 0.05$), 生物量变化不大。据水体理化因子及浮游动物优势种等指数综合评价大泉沟水库为中-富营养型。Pearson 相关性分析结果显示, 水深、总磷含量、高锰酸盐指数和溶解氧是大泉沟水库浮游动物群落结构变化的主要影响因素。

关键词: 水库; 浮游动物; 群落结构; 水环境因子; 水质

文章编号: 1673-5897(2020)6-243-09 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Characteristics of Zooplankton Communities and Their Responses to Water Environmental Factors during Different Hydrological Periods of the Daquangou Reservoir

Zhu Wenjing¹, Hu Wenge^{1,*}, Zhang Yingdong², Jia Wenping³, Ma Decao¹, Gao Yan¹, You Yang², Zhang Xiurong²

1. College of Life Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China

2. Xinjiang Shihezi Manas River Basin Management, Shihezi 832000, China

3. Fisheries Research Institute of Tianjin, Tianjin 300221, China

Received 24 May 2019 accepted 3 August 2019

Abstract: Water samples and plankton surveys were conducted three times at four sampling sites in Daquangou Reservoir during dry season (October 2015), wet season (April 2016) and normal season (July 2016). A Pearson

基金项目: 兵团科技攻关与成果转化计划项目(2015AC010)

第一作者: 朱文静(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水生生物学, E-mail: 1447300928@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: hwg-t@163.com

correlation analysis between the density & biomass of zooplankton and environmental factors was used to explore the relationship between zooplankton community and environmental factors in Daquangou Reservoir, and a comprehensive water quality evaluation was also performed. A total of 39 species of zooplankton were identified in this study, including 21 species of rotifera, 8 species of cladocerans, 5 species of copepods, and 5 species of protozoa. There were 7 dominant zooplankton species ($Y>0.02$) throughout all three sampling periods. Furthermore, the number of zooplankton species, dominant species and species richness all reached a maximum in peace period, while the biomass reached a maximum in dry season. The one-way ANOVA results indicated that the species richness of zooplankton was significantly different among different sampling periods ($P<0.01$), and the species composition and dominant species were also significantly different ($P<0.05$); however, the biomass was at similar level throughout the sampling periods. According to the main nutrient concentration and various indicators of the water samples, the water quality of Daquangou Reservoir belonged to medium-eutrophication type. The Pearson correlation analysis showed that the water depth, total phosphorus, potassium permanganate index and dissolved oxygen were the main factors affecting the zooplankton community structure fluctuations in Daquangou Reservoir. This study will provide valuable information for water resources protection and sustainable fisheries in reservoir area.

Keywords: reservoir; zooplankton; community composition; aquatic environment factors; water quality

浮游动物是一类位于食物链前端、主要以浮游植物和有机碎屑为食、游泳能力弱和营浮游生活的小型水生生物,它们承受着浮游植物和鱼类的上/下行效应,从而可以在一定程度上缓解水体富营养化程度^[1]。水体环境中的溶解氧、pH值和氮磷含量对浮游动物的群落结构影响很大,因此,浮游动物的群落结构可以在一定程度上反映水体的营养状况^[2-3]。此外,有许多种属可作为水污染的指标种,如臂尾轮虫属、异尾轮虫属和飞马哲水蚤等^[4]。随着全国水体的富营养化现象的增多,利用浮游动物的优势种和生物量等对水体水质进行评价并据此进行后续修复已成为生态学领域的重点研究方向^[5]。

大泉沟水库位于新疆维吾尔自治区石河子市以北18 km处,是夹河子水库除险加固中重要的一项工程措施,始建于1954年,初建目的是防洪引水,后用于渔业发展以及农业用水,现已发展成旅游区。大泉沟水库属平原型水库,总库容4 000万 m^3 ,库区面积11 km^2 ,年供水量1.0亿 m^3 。《新疆维吾尔自治区水污染防治工作方案》要求重点监测的32座湖库中就包括大泉沟水库,要求其水质达到Ⅲ类^[6]。随着经济发展,近20年来,市民生活污水、工业污水和畜禽、渔业养殖污水等大量流入大泉沟,以致水环境越来越差,渔业发展等受到严重影响^[7]。目前,对大泉沟水库的研究仅限于水质监测、水库的除险加固及鱼类资源调查,而其中水质监测较为常见,程同福^[8]对大泉沟水库的水质现状和营养水平进行评价,水库水质为Ⅲ类,处于中度富营养化水

平;张亦冰和高宗昌^[6]根据2011—2016年的水质监测发现大泉沟水库水质有4项指标超出其水质目标(Ⅲ类标准);刘力辉和常浩娟^[7]根据石河子市环境监测站2015年对大泉沟水库水质检测结果分析,大泉沟水库水质为V类。而关于大泉沟水库浮游动物的研究未见报道。

为保护大泉沟水库水资源及对渔业资源的合理开发利用提供参考依据,本研究在丰水期、平水期及枯水期3个典型的水文时期进行采样调查,通过大泉沟水库浮游动物群落结构组成、多样性特点、优势种以及水库水体环境因素对浮游动物群落结构的影响,综合分析大泉沟水库浮游动物在水库生态中的重要作用,并对水质状况进行综合评价。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 采样点及采样时间

由于石河子冬季严寒,水面冰层可达1 m,难以进行采样调查,因此,本研究根据大泉沟水库地形状况及所在地区气候特点,分别在水库入水口(A)、库湾(B)、库中心(C)和出水口(D)设置4个采样点(图1),于枯水期(2015年10月)、丰水期(2016年4月)和平水期(2016年7月)进行3次采样调查。

1.2 环境因子测定

在大泉沟水库4个采样点现场同步测定水温(WT)、水深(WD)、透明度(SD)、pH、水色(WC)和溶解氧(DO),不能在现场测定的总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)、亚硝酸盐(NO_2^--N)、硝酸盐(NO_3^--N)和高锰酸盐指数(COD_{Mn}),取水样4℃保存带回实验室进



图1 大泉沟水库采样点示意图

Fig. 1 Location of the sampling sites in Daquangou Reservoir

行测定,每个指标测定做3次重复。测定方法均参照《水和废水监测分析方法》^[9]。其中,透明度和水温分别用SD20型塞氏盘(北京普力特仪器有限公司)、WT型水温计(北京普力特仪器有限公司)测定,pH用PHSJ-3F型pH测定仪(北京宏昌信科技有限公司)进行测定。

1.3 样品的采集与处理

依照《水库渔业资源调查规范》(SL 167—2014)^[10]与常规浮游生物调查方法^[11]分层进行浮游动物样品采集与处理。浮游动物定量样品在实验室浓缩,在光学显微镜和解剖显微镜下对浮游动物样品进行鉴定并计数,浮游动物的鉴定与分类参考《中国淡水轮虫志》^[12]《中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类》^[13]《中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类》^[14]《滇池、洱海浮游动植物环境图谱》^[15]。

1.4 数据处理与分析

生物量与密度的计算参照《淡水浮游生物研究方法》^[16];应用McNaughton^[17]的公式 $Y=(N_i/N)f_i$ 计算浮游动物优势度(Y),应用Y对浮游动物优势种进行分析判断。式中: N_i 为第*i*种的个体数, N 为所有种类总个体数, f_i 为第*i*种出现的频率。在Excel软件中进行理化因子数据对数转换,在SPSS19.0软

件中对浮游动物群落特征与水体理化因子进行Pearson相关性分析及浮游动物密度、优势种的单因子方差分析。

2 结果与分析 (Results and analysis)

2.1 大泉沟水库各时期水质理化特点

大泉沟水库理化因子测定结果如表1所示。由表1可知,同一时期、水库不同位置的理化因子指标不同,除硝酸盐和亚硝酸盐外,环境因子指标平均值最高的时期一定在水库某位置有最大值,最低值亦出现在平均值最低的时期,如平均水温最高值在平水期,同时水温最高值27.34℃出现在平水期的库中心。而硝酸盐浓度的最值都出现在平均值居中的枯水期,亚硝酸盐的最值则出现在平均值最低的平水期。综合来看,最高值出现在平水期库中心的最多,分别为水温、亚硝酸盐浓度、高锰酸盐指数和水色;水温在3个时期变化明显;水色和亚硝酸盐浓度则变化很小;总氮和总磷含量都超过我国中富营养化水质标准,且总磷的量有继续上涨趋势。

2.2 大泉沟水库浮游动物种类

本次研究共鉴定出浮游动物39种,其中,轮虫最多,有21种(53.85%),枝角类其次,有8种(20.51%),桡足类和原生动物种类一样,各5种(12.82%)。各时期浮游动物种类分布差异显著($P<0.05$),其种类分布平水期最高,为34种;其次是丰水期(32种);枯水期最少,为27种。轮虫类和桡足类种类数在平水期最高,枝角类种类数在丰水期较其他时期最多(表2)。

2.3 大泉沟水库浮游动物密度和生物量

对大泉沟水库采样期间浮游动物密度进行单因子方差分析表明,浮游动物密度在不同水文时期具有显著差异($P<0.01$)(图2)。采样期间浮游动物密度变化范围为 $1.62 \times 10^3 \sim 3.56 \times 10^3 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$,平均密度为 $(2.71 \pm 0.992) \times 10^3 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$ 。平水期浮游动物平均密度为最大值,丰水期平均密度为最小值。

采样期间浮游动物生物量变化不大(图3)。通过体积法计算出大泉沟水库浮游动物生物量,其变化范围为 $1.62 \sim 2.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中,生物量最高值出现在枯水期,为 $2.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;生物量最低值出现在丰水期,为 $1.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。大泉沟水库浮游动物年平均生物量值为 $(2.16 \pm 0.65) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 大泉沟水库浮游动物优势种

优势度分析结果显示,3次采样调查期间均是优势种(即 $Y>0.02$)的浮游动物有7种,分别为长三

表 1 新疆大泉沟水库水体环境因子指标
Table 1 The indexes of water environment factors of Xinjiang Daquangou Reservoir

水环境因子 Aquatic environment factors	丰水期 (2016 年 4 月) The wet season (April 2016)	平水期 (2016 年 7 月) The peace period (July 2016)	枯水期 (2015 年 10 月) The dry season (October 2015)	平均值 Average value	枯水期 Dry season				丰水期 Wet season				平水期 Peace period			
					入水口 (A)	库湾(B) Bends in reservoir	库中心 (C)	出水口 (D)	入水口 (A)	库湾 (B)	库中心 (C)	出水口 (D)	入水口 (A)	库湾(B) Bends in reservoir	库中心 (C)	出水口 (D)
					Water inlet (A)		Reservoir center (C)	Water outlet (D)	Water inlet (A)	Bends in reservoir (B)	Reservoir center (C)	Water outlet (D)	Water inlet (A)		Reservoir center (C)	Water outlet (D)
水温(WT)/℃ Water temperature (WT)/℃	14.73	25.68	8.97	16.46	L										H	
水深(WD)/m Water depth (WD)/m	5.18	4.11	3.10	4.13	L							H				
溶解氧(DO)/(mg·L ⁻¹) Dissolved oxygen (DO)/(mg·L ⁻¹)	13.24	8.53	10.62	10.80					H					L		
透明度(SD)/m Transparency (SD)/m	45.13	34.87	43.95	41.32								H		L		
pH	7.78	8.15	8.32	8.08		H				L						
总氮(TN)/(mg·L ⁻¹) Total nitrogen (TN)/(mg·L ⁻¹)	1.41	1.87	1.83	1.70		H					L					
总磷(TP)/(mg·L ⁻¹) Total phosphorus (TP)/(mg·L ⁻¹)	0.04	0.08	0.07	0.06						L			H			
硝酸盐(NO ₃ ⁻ -N)/(mg·L ⁻¹) Nitrate (NO ₃ ⁻ -N)/(mg·L ⁻¹)	0.25	0.32	0.28	0.28		L		H								
亚硝酸盐(NO ₂ ⁻ -N)/(mg·L ⁻¹) Nitrite (NO ₂ ⁻ -N)/(mg·L ⁻¹)	0.011	0.011	0.013	0.012												
氨氮(NH ₄ ⁺ -N)/(mg·L ⁻¹) Ammonia nitrogen (NH ₄ ⁺ -N)/(mg·L ⁻¹)	0.21	0.27	0.34	0.27		H					L				H	
高锰酸盐指数(COD _{Mn})/(mg·L ⁻¹) Permanganate index (COD _{Mn})/(mg·L ⁻¹)	3.01	3.22	2.34	2.86			L								H	
水色(WC) Water color (WC)	15	16	16	16					L		L				H	H

注:表中数据为平均值;L 表示各理化因子最低值出现位置,H 表示各理化因子最高值出现位置;A~D 表示图 1 中的采样位点。
Note: The data in the table are the average values; L show the location of each factor's lowest value, and H show the location of each factor's highest value; A~D show sampling sites in fig.1.

肢轮虫(*Filinia longiseta*)、绿色近剑水蚤(*Tropocyclops prasinus*)、长额象鼻溞(*Bosmina longirostris*)、广布多肢轮虫(*Polyarthra vulgaris*)、大弹跳虫(*Halteria grandinella*)、裂足臂尾轮虫(*Brachionus diversicornis*)和小渠异足猛水蚤(*Canthocamptus microstaphylinus*) (表 3)。其中,轮虫最多,有 3 种;桡足类居中,有 2 种;枝角类和原生动物最少,各 1 种。浮游动物在不同采样时期优势种差异显著($P<0.05$),优势种类数平水期>枯水期>丰水期,同一物种,有可能在某时期优势度较大,但其他时期优势度很小,不能再算作优势种。如优势度为 0.124 的舞跃无柄轮虫(*Ascomorpha saltans*)就是丰水期的优势种,但在另外 2 个时期,其优势度很低,不再是这 2 个时期的优势种。

2.5 水环境因子与浮游动物相关分析

用 SPSS 软件对大泉沟水库水深、水温、水色、透明度、溶解氧、pH、氨氮含量、总氮、总磷、高锰酸盐指数、硝酸氮和亚硝酸氮共 12 种水环境因子与浮游动物密度及生物量进行 Pearson 相关性分析(表 4),结果表明,浮游动物密度与溶解氧和总磷呈显著相关性($P<0.01$),其中,与溶解氧呈显著负相关($P<$

0.01)。生物量与水深、高锰酸盐指数呈显著相关性($P<0.05$),其中与水深呈显著负相关($P<0.05$)。

3 讨论 (Discussion)

3.1 大泉沟水库浮游动物群落结构特征

本调查结果显示,组成大泉沟水库浮游动物群落的物种中,轮虫不论在物种组成还是优势种上都呈现显著优势,这与新疆其他淡水小型水库中轮虫类占绝对优势的调查结果相似^[18-19],大型浮游动物(枝角类和桡足类)所占比例较低;原生动物和轮虫是主要的细胞密度组成成分。在国内水体的研究中,许多水体中都发现有群落结构小型化的现象^[20-21],但有一些水体浮游动物种类以桡足类或枝角类为主,如龚玉艳等^[22]对陵水湾和黄梦仪^[23]对江门海域的研究等。大泉沟水库浮游动物群落结构呈现以小型浮游动物(特别是轮虫)为主导特征的可能原因有以下几点。(1)其渔业利用方式以鲢和鳙鱼为主。研究表明,鲢和鳙捕食枝角类、桡足类能力较强,从而使水体中大型浮游生物减少,呈现出小型化趋势^[24]。(2)大泉沟水库枝角类优势种为体型较小的长额象鼻溞,对其竞争者轮虫类构成的压力较小。

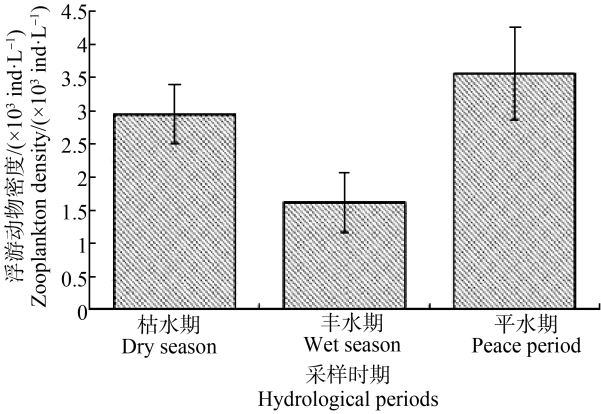


图 2 大泉沟水库不同水文时期浮游动物密度变化
Fig. 2 Changes of zooplankton density in different hydrological periods of Daquangou Reservoir

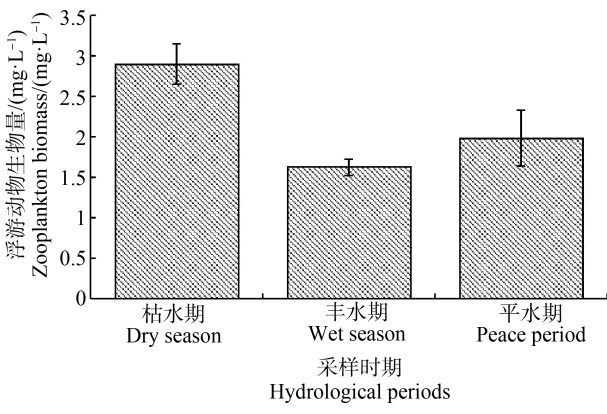


图 3 大泉沟水库不同水文时期浮游动物生物量变化
Fig. 3 Changes of zooplankton biomass in different hydrological periods of Daquangou Reservoir

表 2 大泉沟水库浮游动物物种组成

Table 2 Species composition of zooplankton in the Daquangou Reservoir

	轮虫 Rotifer	枝角类 Cladocera	桡足类 Copepod	原生动物 Protozoa	总计 Total
丰水期 Wet season	17	8	4	3	32
平水期 Peace period	18	7	5	4	34
枯水期 Dry season	13	6	4	4	27
总计 Total	21	8	5	5	39

杨亮杰等^[25]的研究表明,枝角类的种类和密度较低,也是使轮虫类占绝对优势的主要原因之一。(3)其浮游植物群落结构以绿藻门和硅藻门为优势类群^[26],不利于大型浮游动物的摄食,而轮虫类则可以利用其进行生长繁殖,进而发展成为水体的优势类群。类似的研究结果在鄱阳湖中也有报道^[27]。(4)大泉沟水库营养状况为中-富营养级,一般营养状况越好的水体,小型化趋势越明显^[21]。但是引起大泉沟水库的浮游动物小型化如此明显的因素还需深入研究。

在平水期,大泉沟水库浮游动物种类数和密度有最高值,浮游动物物种组成变化的 2 个重要因素分别是食物资源和鱼类捕食。大泉沟水库浮游植物的密度和物种数都在平水期达到最高值,丰水期为最低值^[26],所以以浮游植物为食的浮游动物的密度和物种数在平水期达到最高值。而浮游动物生物量没有 在平水期成为最大值的可能原因是平水期时水体温度较高,水体中鱼类较活跃、滤食浮游动物的能力强,从而使浮游动物生物量降低。在枯水期浮游动物生物量达到最高值则是因为枯水期水温较低,对鳙鱼滤食不利,从而无法对浮游动物进行控制;而浮游动物密度能在平水期达到最大值可能是因为此时浮游植物量充足,且对大泉沟水库的优势种、物种密度和生物量贡献最大的都是轮虫,虽然在平水期鱼类滤食能力增加,但个体小的物种则容易生存。

大量研究已证实,水温可以影响浮游动物生长繁殖、群落组成结构及空间分布^[3,20,26],虽然,大泉沟丰水期水温略高于枯水期水温,但浮游动物密度和生物量丰水期均小于枯水期。大泉沟水库的主要水源为冰雪融水,丰水期大量的冰雪融水流入,对浮游动物的密度和生物量进行了稀释,这可能就是丰水期密度和生物量最低的原因。而丰水期物种数多于枯水期物种数也为此推测提供了依据。同时枝角类在丰水期物种数有最高值可能是因为此时河流刚解封,鲢鱼和鳙鱼的捕食作用弱,到平水期捕食能力增强,且枝角类个体略大,所以被捕食较多,留下个体较小的轮虫等,这一点也可能是上文提及的小型化原因之一。

3.2 大泉沟水库水质评价

曾阳等^[28]提出要准确地评价水质,应当通过浮游动物的优势种、密度、生物量、水库的理化因子以及水库的浮游植物群落结构多样性综合分析得出结论。

何志辉^[29]综合国内 211 个内陆水域提出了用浮游动物生物量评价水质的标准:0.16 ~ 2.19 mg·L⁻¹ (平均 0.96 mg·L⁻¹)为贫营养型,0.28 ~ 17.6 mg·L⁻¹ (平均 2.1 mg·L⁻¹)为中营养型,0.59 ~ 9.52 mg·L⁻¹ (平均 3.59 mg·L⁻¹)为富营养型。大泉沟水库浮游动物除结冰期外年平均生物量为 2.16 mg·L⁻¹,略大于中营养型数值,所以从浮游动物生物量来分析,大泉沟水库属于中营养型水体。

表 3 大泉沟水库不同水文时期共有浮游动物优势种

Table 3 Common dominant species of zooplankton in Daquangou Reservoir during different hydrological periods

浮游动物 Zooplankton	优势种 Dominant species	优势度 Dominance
桡足类 Copepod	绿色近剑水蚤 <i>Tropocyclops prasinus</i>	0.146
	小渠异足猛水蚤 <i>Canthocamptus microstaphylinus</i>	0.021
枝角类 Cladocera	长额象鼻溞 <i>Bosmina longirostris</i>	0.138
	长三肢轮虫 <i>Filinia longiseta</i>	0.269
轮虫 Rotifer	广布多肢轮虫 <i>Polyarthra vulgaris</i>	0.053
	裂足臂尾轮虫 <i>Brachionus diversicornis</i>	0.027
原生动物 Protozoa	大弹跳虫 <i>Halteria grandinella</i>	0.035

表 4 大泉沟浮游动物密度和生物量与环境因子的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between zooplankton density & biomass and environmental factors

	WT	WD	SD	WC	pH	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	COD _{Mn}	DO
密度 Density	0.394	-0.532	-0.703*	0.460	0.642	0.748*	0.949**	0.413	0.788*	-0.182	-0.041	-0.833**
生物量 Biomass	-0.555	-0.813**	0.179	0.190	0.757*	0.460	0.565	0.711*	0.513	0.147	-0.804**	-0.261

注:**在 0.01 水平上显著相关,*在 0.05 水平上显著相关。

Note: * significant correlation at the 0.05 level; ** significant correlation at the 0.01 level.

王胜男和陈卫^[30]曾探寻过浮游动物的物种和数量对水质的影响,发现浮游动物的物种和数量往往对水质调查有很强的指示作用,可以通过浮游动物的群落分布特点及优势种来反映水体现状。水质与浮游动物是互相影响的,贫污性物种多生活在健康的水体且多为优势种,水质下降贫污性物种会因捕食困难而难以生存,从而使得多污性物种成为优势种群。大泉沟水库的浮游动物中,多污性物种有裂足臂尾轮虫、蓴花臂尾轮虫、长三肢轮虫、圆形盘肠溇和僧帽溇等;全部的桡足类都为中污性物种,贫污型物种仅有纵长异尾轮虫和长额象鼻溇,所以从浮游动物指示种来分析,大泉沟水库水体属中-富营养型水体。

《地表水环境质量标准》^[31]湖泊富营养化分级标准认为,总氮浓度低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为贫营养湖泊,介于 $0.1 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为中营养湖泊,高于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为富营养湖泊;透明度高于 500 cm 为贫营养湖泊, $300 \sim 100 \text{ cm}$ 为中营养湖泊,低于 50 cm 为富营养湖泊;总磷在 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下为贫营养状态, $0.01 \sim 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为中营养状态, $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上为富营养状态。大泉沟水库全年总氮浓度都在 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,透明度均在 50 cm 以下,说明大泉沟水库水体营养状态呈现富营养状态;而总磷在 $0.035 \sim 0.084 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,说明大泉沟水库水体营养状态呈现中-富营养状态。同时本研究发现总磷的数值除丰水期外均高于中富营养化的最高值,说明水质有可能继续恶化。

根据马得草^[26]对大泉沟水库浮游植物的群落结构分析判断,大泉沟水库的水质在空间上具有一致性,即同一时间各样点水质基本一致;但在时间上有差异,平水期和丰水期为中营养水库,枯水期为中富营养水库。

综上所述,通过浮游动物的密度、生物量、优势种、水库的理化因子以及水库的浮游植物多样性综合分析表明,大泉沟水库属中-富营养型水库,且库区水质有继续恶化的可能。为了水库的进一步发展,应持续进行水库水质的检测,同时可以采取适当手段应对库区水质的营养化。

3.3 大泉沟水库浮游动物与环境因子间的关系

将大泉沟水库浮游动物群落在时间和空间分布上进行对比发现,浮游动物密度和生物量随季节变化明显,而在空间上的差异不明显。大泉沟水库浮游动物密度与总磷和溶解氧呈显著相关性($P < 0.01$),

其中,与溶解氧呈显著负相关($P < 0.01$),这可能是因为水质较好的水库,浮游生物密度低,对水体的氧消耗较少,因此,水中溶解氧含量高,当水体溶解氧含量不足时,群落结构即会发生显著改变。生物量与水深、高锰酸盐指数呈显著相关性($P < 0.05$),其中与水深呈显著负相关($P < 0.05$),说明浮游动物主要集中在水库上层,此种分布可能与水温和浮游植物的分布有关。

大泉沟水库的溶解氧含量在采样期间平均值为 $10.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中,最大值出现在丰水期,而此时期却是浮游动物密度最小值出现的时期。溶解氧主要来自空气中的氧分子和水体植物的光合作用,丰水期时水流速度快,氧分子的溶解效率增加,且此时浮游动物数量少,减少了对溶解氧的消耗,所以溶解氧在丰水期达到最大值。大泉沟水库浮游动物密度与溶解氧含量呈显著负相关($P < 0.05$),与刘歆璞等^[32]的研究结果一致。

Druvietis 等^[33]认为,水体中营养盐(N、P 和 COD_{Mn})可通过浮游植物间接影响浮游动物群落结构。水库中浮游植物密度与 N、P 等营养盐含量呈正相关,而小型浮游动物又多以浮游植物为食,当浮游植物密度增加时,浮游动物密度必然增加,因此,浮游动物密度亦与 P 浓度成正相关。大泉沟水库丰水期的 N/P 值为 35,这可能是上述浮游动物细胞密度在丰水期达到全年最小值的另一个因素,同时也说明总磷已成为水库中浮游植物及浮游动物生长的限制因子,后期经过水库治理,浮游动物群落结构势必发生改变。

本研究发现,浮游动物生物量与水深呈显著负相关,可能原因是水深影响水温和透明度,大量研究已证实,水温可以影响浮游动物生长繁殖、群落组成结构及空间分布,因而水深也会影响浮游动物群落结构^[3,20,26]。

由于水体环境因素与浮游动物之间的关系错综复杂,本文对于其关系的解释可能有局限性,更全面的解释还有待深入的研究。

经过对大泉沟水库浮游动物的调查,发现组成大泉沟水库的浮游动物中,轮虫占据显著优势,浮游动物群落结构呈现小型化特征;浮游动物密度和生物量随季节变化明显。溶解氧和磷含量是浮游动物群落结构的主要影响因子。通过浮游动物的密度、生物量、优势种、水库的理化因子以及水库的浮游植物多样性综合分析可知,大泉沟水库属中-富营养型

水库,且库区水质有继续恶化的可能。

通讯作者简介:胡文革(1966—),女,农学博士,教授,主要研究方向为环境微生物学及水生生物学。

参考文献(References):

- [1] Carpenter S R, Kitchell J F, Hodgson J R, et al. Regulation of lake primary productivity by food web structure [J]. *Ecology*, 1987, 68(6): 1863-1876
- [2] Newton G M. Estuarine ichthyoplankton ecology in relation to hydrology and zooplankton dynamics in a salt-wedge estuary [J]. *Marine and Freshwater Research*, 1996, 47(2): 99-111
- [3] 李共国,包薇红,徐石林,等.甬江干流浮游动物群落结构季节动态与水环境的关系[J].*水生生物学报*, 2015, 39(1): 1-12
Li G G, Bao W H, Xu S L, et al. Seasonal change of zooplankton communities and its relationship with aquatic environments in the Yongjiang River, Ningbo [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(1): 1-12 (in Chinese)
- [4] Chen L J, Liu Q, Peng Z R, et al. Rotifer community structure and assessment of water quality in Yangcheng Lake [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30(1): 47-58
- [5] 王璐璐,董芳,李芳芳,等.大辽河水系夏季后生浮游动物群落结构及水生态评价[J].*生态学杂志*, 2013, 32(2): 389-395
Wang L L, Dong F, Li F F, et al. Metazoan zooplankton community structure and aquatic ecology of Daliaohe River, North China in summer [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 389-395 (in Chinese)
- [6] 张亦冰,高宗昌.大泉沟水库水污染防治措施分析[J].*水资源开发与管理*, 2018, 16(3): 42-45
Zhang Y B, Gao Z C. Analysis on prevention and control measures of water pollution in Daquangou Reservoir [J]. *Water Resources Development and Management*, 2018, 16(3): 42-45 (in Chinese)
- [7] 刘力辉,常浩娟.石河子大泉沟水库污染现状及治理措施[J].*农业科技与信息*, 2017(5): 41-43
- [8] 程同福.玛纳斯河中游四大水库水质现状及富营养化分析对策[J].*水利科技与经济*, 2015, 21(11): 73-74, 80
- [9] 中华人民共和国国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002: 28-88
- [10] 中华人民共和国水利部.水库渔业资源调查规范: SL 167—2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014
- [11] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2版.北京:中国环境科学出版社,1990: 11-21
- [12] 王家楫.中国淡水轮虫志[M].北京:科学出版社,1978: 1-282
- [13] 沈嘉瑞.中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水桡足类[M].北京:科学出版社,1979: 1-450
- [14] 蒋燮治,堵南山.中国动物志 节肢动物门 甲壳纲 淡水枝角类[M].北京:科学出版社,1979: 1-297
- [15] 杨苏文.滇池、洱海浮游动植物环境图谱[M].北京:科学出版社,2015: 203-349
- [16] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1991: 373-402
- [17] McNaughton S J. Relationships among functional properties of Californian grassland [J]. *Nature*, 1967, 216(5111): 168-169
- [18] 袁林,孙玲霜,朱新英,等.新疆红山水库浮游动物群落结构特征[J].*干旱区地理*, 2011, 34(6): 1002-1008
Yuan L, Sun L S, Zhu X Y, et al. Ecological features of zooplankton community of Hongshan Reservoir in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(6): 1002-1008 (in Chinese)
- [19] 高岩,张映东,胡文革,等.新疆石河子市蘑菇湖水库浮游动物的群落特征及营养状态评价[J].*动物学杂志*, 2018, 53(6): 890-898
Gao Y, Zhang Y D, Hu W G, et al. Zooplankton community and trophical status of Moguhu Reservoir Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2018, 53(6): 890-898 (in Chinese)
- [20] 桂萍,余飞,魏锦程.鹊山引黄水库浮游动物时空分布特征[J].*生态科学*, 2019, 38(2): 199-205
Gui P, Yu F, Wei J C. The spatial-temporal distribution characteristics of zooplankton in Queshan Yellow River Reservoir [J]. *Ecological Science*, 2019, 38(2): 199-205 (in Chinese)
- [21] 郭飞飞,张云,赵广,等.金沙河水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J].*生态学杂志*, 2016, 35(8): 2208-2216
Guo F F, Zhang Y, Zhao G, et al. Community structure of zooplankton in the Jinshahe Reservoir and its relationship with environmental factors [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(8): 2208-2216 (in Chinese)
- [22] 龚玉艳,肖雅元,徐姗楠,等.陵水湾浮游动物群落结构特征及其季节变化[J].*中国水产科学*, 2019, 26(1): 71-81
Gong Y Y, Xiao Y Y, Xu S N, et al. Characteristics of zooplankton community structure and its seasonal variation in Lingshui Bay [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(1): 71-81 (in Chinese)
- [23] 黄梦仪.江门海域浮游动物群落结构及季节变化特征.

- 中国水产学会海洋牧场专业委员会, 中国水产学会渔业资源与环境专业委员会. 第二届现代化海洋牧场国际学术研讨会和中国水产学会渔业资源与环境专业委员会2018年学术年会论文集[C]. 大连: 中国水产学会海洋牧场研究会, 2018: 1
- [24] 杨丽丽, 何光喜, 胡忠军, 等. 鲢鳙占优势的千岛湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的相关性[J]. 水产学报, 2013, 37(6): 894-903
- Yang L L, He G X, Hu Z J, et al. Community structure of zooplankton and its relation to environmental factors in the silver-carp-and-bighead-carp-dominated Qiandao Lake [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(6): 894-903 (in Chinese)
- [25] 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 等. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. 水生生物学报, 2014, 38(4): 720-728
- Yang L J, Lv G H, Zhu J Q, et al. Characteristics of zooplankton community in Hengshan Reservoir and water quality assessment [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(4): 720-728 (in Chinese)
- [26] 马得草. 大泉沟水库鱼类资源调查及生态渔业增殖模式优化[D]. 石河子: 石河子大学, 2017: 27-36
- Ma D C. Daquangou reservoir fish resources investigation and fishery breeding ecological pattern optimization [D]. Shihezi: Shihezi University, 2017: 27-36 (in Chinese)
- [27] 王金秋, 吴建平, 於燕斌, 等. 春秋两季鄱阳湖浮游动物的编目、数量分布与变动[J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 345-352
- Wang J Q, Wu J P, Yu Y B, et al. The specific list, quantitative distribution and change of zooplankton in the season of spring and autumn in Poyang Lake [J]. Journal of Lake Science, 2003, 15(4): 345-352 (in Chinese)
- [28] 曾阳, 付秀娥, 苗明升, 等. 基于大型浮游动物多样性与水质参数相关性分析的温榆河水质评价[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(2): 162-170
- Zeng Y, Fu X E, Miao M S, et al. Water quality assessment of Wenyuhe River based on the cross-correlation analysis on the diversity of macro-zooplankton and water parameters [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2012, 7(2): 162-170 (in Chinese)
- [29] 何志辉. 中国湖泊和水库的营养分类[J]. 大连水产学院学报, 1987, 2(1): 1-10
- He Z H. A trophic classification of the lakes and reservoirs in China [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1987, 2(1): 1-10 (in Chinese)
- [30] 王胜男, 陈卫. 浅析淡水浮游动物的种类组成及其生态功能作用[J]. 生物学通报, 2012, 47(10): 10-13
- [31] 中华人民共和国国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2002
- [32] 刘歆璞, 王丽卿, 张宁, 等. 青草沙水库后生浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1238-1248
- Liu X P, Wang L Q, Zhang N, et al. Community structure of metazoan zooplankton and its relationships with environmental factors in Qingcaosha Reservoir of Shanghai, East China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1238-1248 (in Chinese)
- [33] Druvietis I, Springe G, Urtane L, et al. Evaluation of plankton communities in small highly humic bog lakes in Latvia [J]. Environment International, 1998, 24(5-6): 595-602